

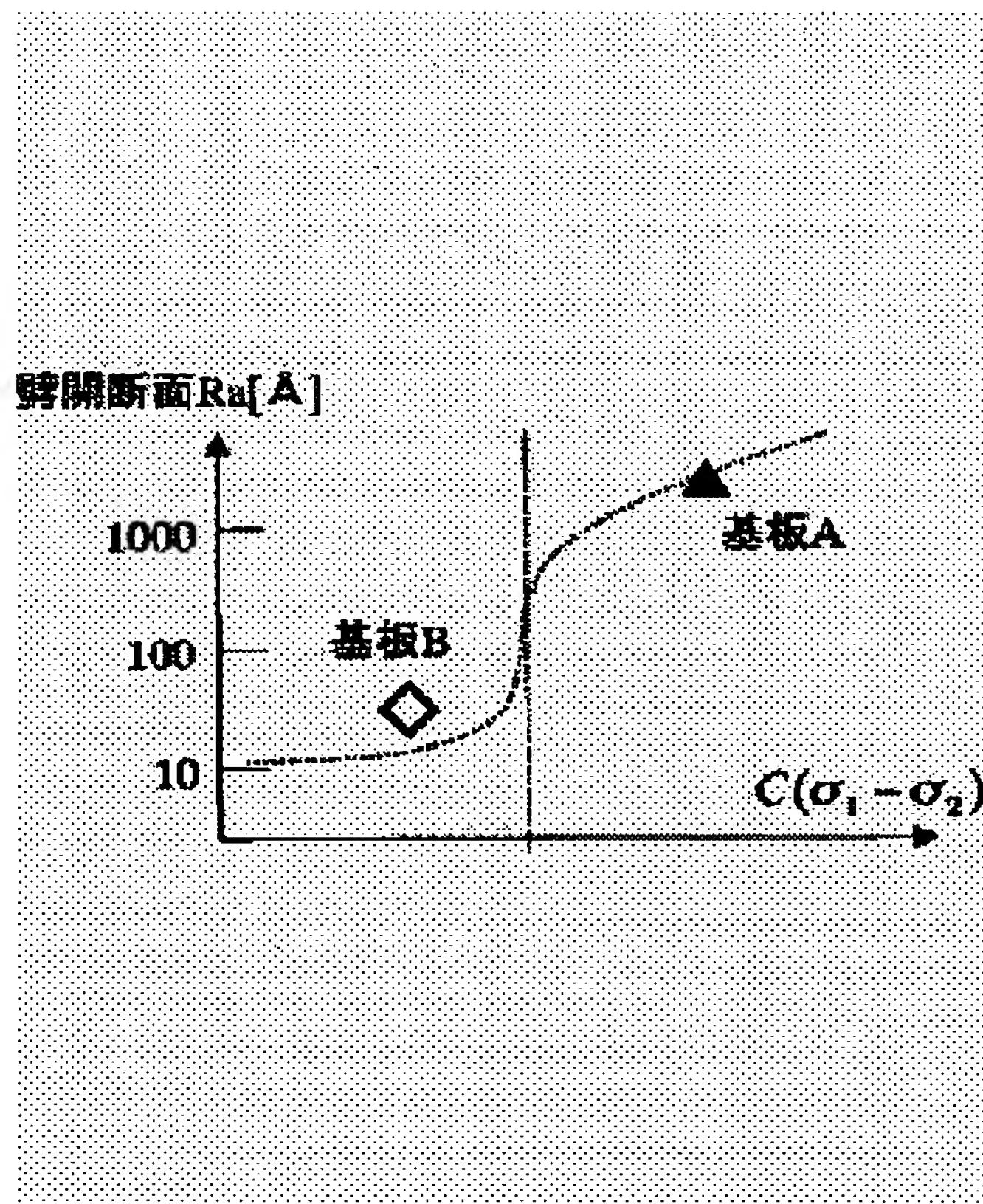
GaN SINGLE-CRYSTAL SUBSTRATE AND DECIDING METHOD OF CLEAVAGE QUALITY THEREOF

Patent number: JP2002299741
Publication date: 2002-10-11
Inventor: UEMATSU KOJI
Applicant: SUMITOMO ELECTRIC INDUSTRIES
Classification:
- **international:** C30B29/38; H01S5/02; H01S5/323; H01L21/66;
C30B29/10; H01S5/00; H01L21/66; (IPC1-7): H01S5/02;
C30B29/38; H01L21/66; H01S5/323
- **european:**
Application number: JP20010104129 20010403
Priority number(s): JP20010104129 20010403

[Report a data error here](#)

Abstract of JP2002299741

PROBLEM TO BE SOLVED: To provide a nondestructive deciding method for deciding the quality as to whether the cleavage quality of a GaN wafer is good without having to actually cleave it.
SOLUTION: The photoelastic effect of the GaN wafer is measured so that its cleavage quality is decided to be proper, when its distortional value $C(\sigma_1 - \sigma_2)$ is not larger than 5×10^{-5} and is decided as being to be faulty, when its distortional value exceeds 5×10^{-5} .



Data supplied from the [esp@cenet](#) database - Worldwide

(19)日本国特許庁 (JP)

(12) 公開特許公報 (A)

(11)特許出願公開番号
特開2002-299741
(P2002-299741A)

(43)公開日 平成14年10月11日(2002.10.11)

(51)Int.Cl.⁷

識別記号

F I

マーク^{*}(参考)

H 01 S 5/02

H 01 S 5/02

4 G 0 7 7

C 3 0 B 29/38

C 3 0 B 29/38

D 4 M 1 0 6

H 01 L 21/66

H 01 L 21/66

L 5 F 0 7 3

H 01 S 5/323

6 1 0

H 01 S 5/323

6 1 0

審査請求 未請求 請求項の数2 OL (全11頁)

(21)出願番号

特願2001-104129(P2001-104129)

(71)出願人 000002130

住友電気工業株式会社

(22)出願日

平成13年4月3日(2001.4.3)

大阪府大阪市中央区北浜四丁目5番33号

(72)発明者 上松 康二

兵庫県伊丹市昆陽北一丁目1番1号住友電
気工業株式会社伊丹製作所内

(74)代理人 100079887

弁理士 川瀬 茂樹

Fターム(参考) 4G077 AA02 AB10 BE15 DB05

4M106 AA01 BA05 CB30

5F073 DA32 HA10 HA11 HA12

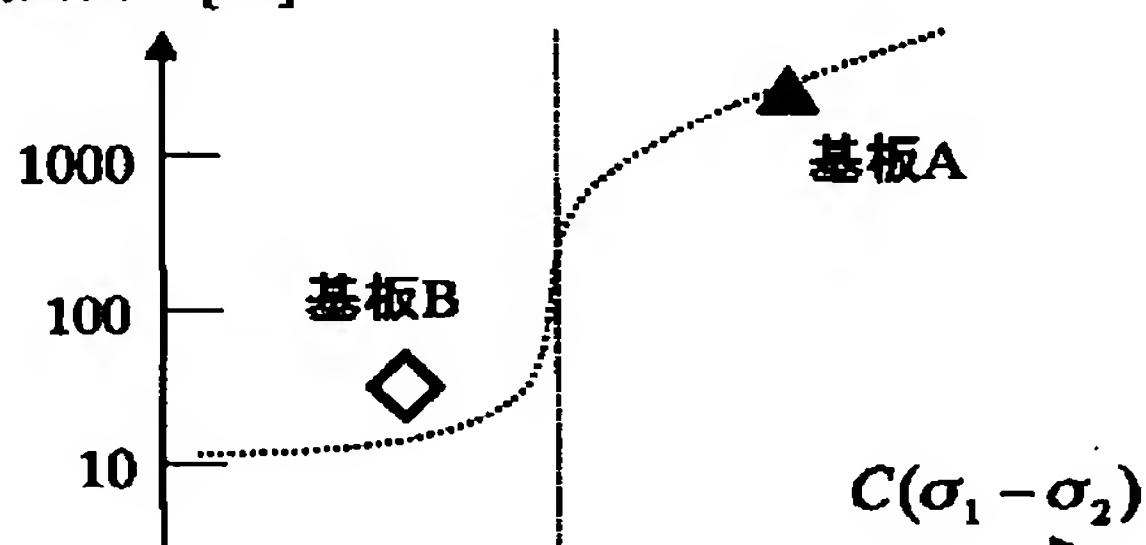
(54)【発明の名称】GaN単結晶基板の劈開性の判定方法とGaN単結晶基板

(57)【要約】

【課題】GaNウェハを実際に劈開することなく劈開性の良否を非破壊で判定する方法を与えること。

【解決手段】GaNウェハの光弾性効果を測定して、歪値 $C(\sigma_1 - \sigma_2)$ が 5×10^{-5} 以下であれば劈開性が良好であり、これを越えると劈開性不良と判定する。

劈開断面Ra[Å]



【特許請求の範囲】

【請求項1】 GaN単結晶基板の全面に単色光をあて光弾性効果によって歪値を測定し、測定した歪値の面内での最大値が、 5×10^{-5} 以下であれば劈開性が良好であると判定し、 5×10^{-5} を越えれば劈開性が不良であると判定することを特徴とするGaN単結晶基板の劈開性の判定方法。

【請求項2】 GaN単結晶基板の全面に単色光をあて光弾性効果によって歪値を測定し、光弾性効果によって測定した歪値の面内での最大値が、 5×10^{-5} 以下であることを特徴とするGaN単結晶基板。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】この発明は窒化ガリウム(GaN; gallium nitride)基板の評価方法と窒化ガリウム(GaN)基板に関する。GaN基板は青色発光素子(半導体レーザLD、発光ダイオードLED)の材料として有用である。青色光を電子のバンドギャップ遷移によって発生させるにはバンドギャップの広い材料が必要である。広バンドギャップ材料としてセレン化亜鉛(ZnSe; zinc selenide)とGaNを用いた青色発光素子が実用化されている。いずれも発光ダイオード(LED)については技術的に完成しており実用に供されている。LDとしては、ZnSe系が先行しており、GaN系のLDもそれに続いているという現状である。

【0002】GaN系の発光素子は、GaN層を基本としAlGaN層やGaNNの活性層を持ち、青色や青緑色の発光をする。良質のGaN基板が製造困難であるので、サファイヤ基板の上にGaN、GaNNやその他の窒化物の薄膜を成長させる。GaN系発光素子は、現在もサファイヤ基板(α -Al₂O₃)の上にヘテロエピタキシャル成長させて作られる。

【0003】サファイヤ基板は化学的に安定であり耐熱性もある。格子定数は食い違うがGaNバッファ層を三回対称性のあるサファイヤ基板の上に成長させれば、GaN層、GaNN層をその上に成長させることができる。サファイヤ基板の上に製造されたGaN系LEDは青色発光し量産されており実績もある。

【0004】これらはサファイヤ基板が付いたままの素子である。既に大いに実績があるが、サファイヤ基板GaN-LEDにはいくつかの欠点がある。格子定数も結晶構造も違うのでサファイヤ上のGaNは欠陥密度が高い。サファイヤ基板は堅牢でいいのであるが反面自然劈開できないという難点がある。そこでウェハプロセスが終わったあと刃物によって縦横に切断(ダイシング)してチップとする。その工程の歩留まりは良くない。チップに切り出しシステムに載せてリードをボンディングするがサファイヤは絶縁体だから底面から電極を取り出せない。そこでn型、p型電極ともに上方から取り出すようになっている。そのような欠点があるが実用上差し支え

ないからLEDとして広く使用されている。

【0005】LDの場合は少し事情が異なる。LDとする場合は両端面にミラー面(共振器)が必要である。サファイヤは劈開できないのでダイシング加工でチップに分離する。そのままでは端面は粗面である。GaN層の両端はミラー面にしないといけないので研磨して平坦にして反射率を上げる必要がある。難しいし手間の掛かることがあるが、サファイヤ基板の側面をエッチングやイオンミーリングで削ってミラー面を出してLDの共振器としている。例えば

【0006】①M. Hansen, P. Fini, L. Zhao, A. C. Abare, L.A. Coldren, J.S. Speck, S.P. DenBaars, "Improved characteristics of InGaN multiple-quantum-well laser diodes grown on laterally epitaxially overgrown GaN on sapphire", Appl. Phys. Lett. vol. 76, No. 5, p529(2000)

【0007】はC面のサファイヤ基板の上にMOCVD法によるラテラルオーバーグロース法(後述)によってGaN層を成長させ、その上にInGaNの多重量子井戸構造の活性層を付けたInGaN系LDを提案している。これはサファイヤ基板を切り出し、塩素を含むガスを使うRIE(反応性イオンエッチング)によって端面を削ってLD共振器のミラー面を形成している。サファイヤ基板LDは実用化されているが、いずれもサファイヤ面をエッチングなどによって鏡面に削る必要がある。サファイヤは硬いので簡単にミラー面を出すことができない。

【0008】サファイヤ基板LDは実用化されているが劈開がないからミラー面の形成が難しい。やはりLDとする場合は、基板をGaNとして、GaN層や活性層のGaNN層をエピタキシャル成長させるのがよい筈である。もしもそれが可能であれば劈開によってミラー面が生成される。劈開ができればこれを共振器としてGaN系のLDが容易に製造できる筈である。

【0009】GaNは六方晶系であって異種基板の上にエピタキシャル成長する時は必ずC面成長になる。六方晶系だから面方位や線の方位は4つのミラー指数を用いて表現する。 $\{h k m n\}$ というような表現である。最後の4つ目の指数がc軸方向を表現する。 $\{h k m n\}$ は包括表現であり、 $(h k m n)$ は個別面表現である。

$[h k m n]$ が個別の方向を示し、 $\langle h k m n \rangle$ が包括方向表現である。C面というのは $\{0001\}$ 面である。c軸方向に成長するというのは $\langle 0001 \rangle$ 方向に成長するということである。

【0010】GaNの場合劈開といつても簡単ではない。劈開面は $\{1-100\}$ の方向である。これはC面に直交する。だからC面を持って成長させた通常のGaN結晶には、表面に直交する劈開面 $\{1-100\}$ が存在する。しかし六方晶系であるから劈開面 $\{1-100\}$ が6つあって、それぞれ60度、120度、180

度の傾斜角をなす。だから劈開面にそって切れば平行四辺形になってしまふ。矩形チップとする場合平行2辺を劈開面にすることができるが残り2辺は非劈開面とならざるをえない。しかしそれでもレーザダイオードとする場合、ストライプ(活性層)の端面を自然劈開でミラー面とすれば工程を短縮できるはずである。

【0011】GaAsなどのLDは自然劈開を共振器(レーザキャビティ)ミラー面としており、GaAs-LDでは劈開面共振器はごく普通のものである。

【0012】GaN単結晶基板ができてその上にGaN、GaInNなどのエピ層を積層してLDにしたとして、自然劈開して共振器面を出したとする。その場合ミラー面とするためには劈開面が平滑平坦で鏡面でなければならない。しかしそれは必ずしもそうはならないことがある。

【0013】GaNウェハが得られたとして、その上に幾つもの薄膜をエピタキシャル成長させ、さらに蒸着、拡散、エッチングなどによってエピウェハの上にデバイスを作製して自然劈開してチップに分離したとき劈開面がきれいに形成されなかつたらLDにならない。現在以下に述べる方法によってGaNウェハを製造できるが、その上にデバイスを作つても歩留まりが低い。検査の結果デバイスの劈開面が乱れており所望の反射率を持たないということもある。そのチップは不良であるから排除される。

【0014】そのGaNデバイス製作のために傾注された材料や工程、時間が無駄になる。そのようなことで歩留まりが低いので現在のところGaN基板上のLDはいまだ実験段階にとどまっている。サファイヤ基板LDがGaInN系LDとして主流であるのは一つにはそういう理由もある。

【0015】GaN基板LDの歩留まりを高めるには予めミラーウェハの段階でそのGaNウェハが自然劈開で綺麗な面が出るのかそうでないのかを判定できることが望ましい。もしそれが可能であれば良品とされたウェハだけを選んでエピ成長、デバイス作製をすればよいから全体としての歩留まりが大いに向上するはずである。

【0016】

【従来の技術】初めにGaNの単結晶基板を製造する技術を紹介する。窒素成分の材料の蒸気圧が高いから、通常の引き上げ法(チョクタルスキー)や、ポート法(ブリッジマン)ではGaNの成長ができない。そこで薄膜を製造するための気相エピタキシャル成長技術を転用して厚い基板を製造する。サファイヤ基板の上に薄いGaNエピ層を気相で成長させる方法として、MOCVD法、MOC法、HVPE法、昇華法などがある。これらは原料や、反応の違いによる区別である。サファイヤ基板の上にGaNを厚く成長させたとしてもサファイヤ基板を取り除くことができないからGaN単体にすることはできない。

【0017】そこでGaAsを基板としてその上にGaNを気相成長させることを考える。GaAsの上にGaNを成長させる場合、GaNを厚く成長させたあと、GaAsをエッチングや研磨によって除去することができるGaNの単体の結晶を得る事ができる。

【0018】ところがGaAsの上にGaNを成長させた場合、必ず転位が大量に発生し転位が消えることなく結晶成長に従つていつまでも伸びてゆくという欠点がある。そこで多数の穴を配列させたマスクをGaAs基板の上に設け穴からGaNを成長させてマスクの上で初めて隣接結晶が相会するような成長方法が本発明者によって開発された。ラテラルオーバーグロース法(Lateral Overgrowth)という。これは本出願人になる、

【0019】②特願平9-298300号

③特願平10-9008号

【0020】などに詳しい説明がある。先述の①もこれを使っている。成長方法は前記の4つの方法の何れでも良い。3回対称性をもつGaAs(111)基板を用いる。この方向は、全面にGaNが露呈する場合と、Asが露呈する場合がある。GaAs(111)GaN面とかGaAs(111)As面とか言って区別する。ここではどちらの面でも利用できる。

【0021】GaAs(111)基板の上にドット状、ストライプ状の窓を規則的に多数配列した100nm~数十nm厚みマスクを付ける。窓の配列は同一寸法の正六角形を隙間なく並べその正六角形の中心に窓があるというような配列である。マスクの上にはGaNの結晶粒ができず、窓から露呈したGaAsの上にGaNの島状の結晶が孤立して成長する。低温(450°C~500°C)で数十nmのマスクより薄いバッファ層を成長させる。その後温度を上げて(800°C~1050°C)、GaN層を成長させるとマスク厚みに達する。

【0022】窓を越えるとGaNはマスク上を横方向にのびる。この時の横方向の成長は自由な成長であるから欠陥の発生は少ない。隣接する窓の境界が正六角形をしているからGaN薄膜は同時に境界に到達し相合する。このあとは上方にGaN膜が成長していく。GaAs(111)の上の成長であるから、GaNは全体としてC面成長になる。厚みが70μm~1000μmになるまでエピタキシャル成長を持続する。結晶の表面は凹凸がありシリガラスのようにくもっている。

【0023】エピタキシャル成長が終わるとGaN/GaAs結晶を取り出し王水によってGaAsだけをエッチング除去する。GaNの結晶が残ることになる。これらの両面を研磨することによって平滑な両面をもつ単結晶が得られる。

【0024】ラテラルオーバーグロース法によってかなり厚いc軸方向に成長したGaN単結晶が得られる。この単結晶を薄く切って種結晶とすることによって、GaN基板からGaNをラテラルオーバーグロースすること

ができる。すると成長のあと基板だけを除去するという必要もない。そのようなGaNを基板としてGaN単結晶を作り出す方法は本発明者の

【0025】④特願平10-102546号

【0026】に記載がある。GaN単結晶を基板にしてGaNを作りその上にまた気相成長によってGaN基板を製造する。これによって直径が20mm以上のGaNウエハを製造できる。成長させたGaN単結晶の厚みは20mm~30mm程度のものまで得られる。気相成長の時間を長くすればいくらでもできそうであるが、あまりに厚く積むと歪が大きくなる。内部応力が蓄積し結晶内部に歪を発生させる。結晶を薄く切り出してウエハにすると内部応力が顕在化してウエハを彎曲させる。円形ウエハの場合中央部が飛び出して時計皿のような形状に歪む。そのような制限があるからあまり厚く積む事ができない。

【0027】サファイア基板の上にGaN薄膜を成長させるために開発された方法がいくつかあるのでそれを述べる。これらの方法はGaN基板の上にGaNを成長させるのにも応用できる。さらにこれらの方法によって作製したGaN/GaAs結晶からGaAsを除去し、自立したGaN結晶を得て、これを種結晶とするGaN気相成長にも用いることができる。

【0028】(1) 有機金属気相成長法(MOCVD法)

そのうちで最もよく利用されているのはMOCVD法である。コールドウォールの反応炉において、TMGとアンモニアを水素で希釈した原料ガスを加熱したサファイア基板に吹き付けることによって基板上で直ちに反応をおこさせてGaNを合成する。これは大量のガスを吹き付けてその一部だけがGaN薄膜形成に寄与するので残りは無駄になる。収率が低い。LEDの一部をなすGaN薄層の形成にはよいが、厚いGaN結晶層を積むのには向いていない。それに有機金属に含まれる炭素が不純物として混入するので特性を落とす。炭素のために黄色く色付きn型であるから電子を出す。不純物散乱によつて電子移動度を下げ電気特性を低下させる。

【0029】(2) 有機金属塩化物成長法(MOC法)
MOC法はホットウォール型反応炉においてTMGとHC1を反応させ一旦GaNを作り、これを加熱させた基板の近くでアンモニアと反応させGaNとする。この方法はGaNを経るのでMOCVD法よりも炭素の混入が少ないとそれでも炭素混入があり、GaN膜が黄色く着色している。電子移動度の低下などやはり問題がある。

【0030】(3) ハイドライド気相成長法(HVPE法)

HVPE法は、GaN単体を原料とする。図1によって説明する。ホットウォール型反応炉1の周囲にはヒータ2が設置されている。反応炉1の上頂部に2種類の原料ガ

スを導入するためのガス導入管3、4が設けられる。反応炉1の内部上方空間にGaNポート5を設ける。GaN固体をGaNポート5に収容するがヒータ2によって加熱するとGaN融液6になる。反応炉1の上方のガス導入口3はGaNポート5に向かって開口している。これはH₂+HC1ガスを導入する。もう一方のガス導入管4はGaNポート5より下方で開口している。これはH₂+NH₃ガスを導入する。

【0031】反応炉1の内部空間の下方にはサセプタ7が回転軸8によって回転昇降自在に支持される。サセプタ7の上にはGaN基板を載せる。あるいはGaNAs基板から出発しGaNを作ることができればサセプタ7の上にGaN基板を載せることもできる。ヒータ2によってサセプタ7や基板9を加熱する。HC1(+H₂)ガスをガス導入管3から供給しGaN融液6に吹き付けるとGaNClというガス状の中間生成物ができる。これが炉内を落下して加熱された基板の近傍でアンモニアと接触する。基板9の上でGaNClとNH₃の反応が起こってGaNが合成される。この方法は原料が炭素を含まないからGaN薄膜に炭素が混入せず電気特性を劣化させるということがない、という利点がある。

【0032】(4) 昇華法

GaNは高圧を掛けないと融液にできない。低圧で加熱すると昇華してしまう。この方法は、GaN多結晶を加熱し昇華させて空間中を輸送し、より温度の低い基板に堆積させるものである。これらは反応炉や、原料ガスの違いによる分類である。

【0033】

【発明が解決しようとする課題】このようにしてGaN単結晶のウエハを製造することができるようになった。その上に発光デバイスを製造して劈開によってチップに切り出すことができる。LEDの場合はチップに分離するだけでよいから劈開面の状態は問題にならない。しかしLDとする場合劈開面はミラーとなるのであるから平滑、平坦であることが必要である。劈開面が粗面であつたり欠けがあつたりしてはいけない。

【0034】単結晶であるし自然劈開だから当然に綺麗な面が出るはずだと思うかもしれないがそうではない。GaN結晶を厚く成長させるから冷却したときに内部歪が発生して応力が生じる。応力が無秩序に存在するので自然劈開しても劈開面が乱れることがある。その場合折角エピウエハの上にバッファ層、活性層やキャップ層、埋め込み層などレーザ構造を作つても、いざ劈開となつてから綺麗な劈開面が出るのか、あるいは不規則な面しかできないのか分からぬのでは困る。ウエハプロセスによってエピウエハの上にデバイスを作製する前に、そのウエハが綺麗な劈開面を形成するのかどうかという劈開可能性がわかつた方が良い。

【0035】そのようにミラーウエハの段階でウエハがうまく劈開できるのか、そうでないのかという劈開性を

判定できるような方法を提供することが本発明の第1の目的である。さらにデバイス作製後に綺麗な劈開面を与えるGaNウェハを提供することが本発明の第2の目的である。

【0036】

【課題を解決するための手段】本発明のGaNウェハの劈開可能性判定法は、単位厚み当たりの光弾性歪値の最大値が 5×10^{-5} 以下であるか、これを越えるかによって判定する。つまり歪値が 5×10^{-5} 以下であれば、そのウェハは劈開可能性があり、 5×10^{-5} を越える場合は劈開不適ということである。だから光弾性歪値が 5×10^{-5} 以下のGaN基板を選択すればよい。つまり光弾性によって測定した歪によってウェハの劈開の可否を判定する、という点に本発明の骨子がある。

【0037】

【発明の実施の形態】光弾性というのは物体の内部の応力 σ によって光の屈折率が変化するという現象をいう。つまり内部応力の異方性によって結晶に複屈折(birefringence)が発生するということである。応力の主軸の方向は結晶系によって異なるが結晶方位に準拠した直交する主軸x、y、zを定義することができる。複屈折性がない等方的な物体の場合、光の偏波面がどの方向であってもその光に対する屈折率nは同じである($n_x = n_y = n_z$)。しかし主軸方向の応力が相違する場合、屈折率が応力に比例して変化する。そのような性質を光弾性と呼ぶ。

【0038】単位応力増加によって引き起こされる屈折率の変化率を光弾性係数Cという。これは物質によって異なる定数である。同じ物質であっても結晶構造によって相違する。同じ物質で結晶構造が同じでも温度によって相違する。同じ物質で結晶構造が同一で温度が同じであれば光弾性係数Cは同じである。光の偏波方向によって屈折が変化するのであるから光の偏光方向での屈折率が問題である。主軸方向の応力を σ_x 、 σ_y として、その方向に偏波面をもつ光の屈折率の変化を Δn_x 、 Δn_y とすると、

$$\Delta n_x = C \sigma_x, \\ \Delta n_y = C \sigma_y,$$

【0040】によって与えられる。 σ の単位は力/面積でありPa、 $k\text{gf}/\text{cm}^2$ などで表現できる。屈折率は無次元だから光弾性係数Cの単位は Pa^{-1} 、 $\text{cm}^2/\text{k}\text{gf}$ などで表現できる。しかしこの値はGaNについて本発明者には未だ測定ができていない。いまだCは不明である。Cの値が分かった方がGaN結晶の内部応力構造がより明確にわかることになろうが、本発明を実施するに当たってはCの値は分からなくても差し支えない。

【0041】厚さがtの結晶の場合z方向に進行する波長 λ の光を入射させると光路長差は $t(\Delta n_x - \Delta n_y)$ となる。波長が λ だから、その位相差 δ は 2π を

掛けて λ で割れば求めることができる。

【0042】

$$\delta = 2\pi t (\Delta n_x - \Delta n_y) / \lambda \\ = 2\pi t C (\sigma_x - \sigma_y) / \lambda$$

【0043】によって与えられる。つまり等方的な応力であって主軸方向の力に差がなければ位相差 δ は現れない。しかし主軸方向の応力に差があればx偏波とy偏波の光について複屈折が発生し、位相差が生じる。このような応力の違いによって複屈折が生じるので光弾性係数Cが既知であれば、位相差 δ から応力の差 $\sigma_x - \sigma_y$ が分かる。応力の差がわかるのであって、個々の σ_x 、 σ_y は分からぬ。しかしそれも差し支えのことである。その理由は以下の説明でわかるが本発明は位相差だけを用いて劈開の判定を行うからである。それでは位相差 δ をどうして測定するのか?これを述べる。

【0044】光弾性効果の実際の測定方法のあらましを図2によって説明する。そのような光弾性測定装置自体は公知である。図2のように単色光源、偏光子(Polarizer)P、 $\lambda/4$ 板Q1、試料、 $\lambda/4$ 板Q2、検光子(Analyser)Aを直線上に配列する。図2のように偏光子Pの偏光方向と検光子Aの偏光方向とは光軸廻りに相対的に回転変化させることができる。偏光子Pは円偏光、橢円偏光を一定方向に偏波面をもつ直線偏光に変換する素子である。直線偏光を偏光子に通すと偏波面と偏光面の成す角度の余弦(cos)分の直線偏光になる。検光子Aというのは偏光子と同じものであるが試験光のうち特定の直線偏光成分を取り出す作用のある素子である。

【0045】 $\lambda/4$ 板というのは直交する偏波面の光に対する位相を $1/4$ だけずらす作用のある素子である。つまり複屈折性の結晶を丁度位相差が $\lambda/4$ になるような長さに切断した光学素子である。それだけでは主軸の方向が2つある事になり図2のように主軸方向Q1というのが決められない。そこで二つの直交偏波のうち位相が90度遅れる方の偏波方向を $\lambda/4$ 板の主軸と定義する。二つの $\lambda/4$ 板があり、それぞれQ1、Q2と呼ぶが、それぞれの主軸方向をも図2に示す。つまり第1の $\lambda/4$ 板の直交偏波の軸はQ1、Q2の方向なのであるが、位相が90度遅れる方の偏波面がQ1である。第2の $\lambda/4$ 板の直交偏波の軸はQ1、Q2であるが、位相が90度遅れる方の偏波面がQ2なのである。

【0046】ここでは $\lambda/4$ 板の主軸Q1が偏光子の偏波面方向P、検光子の偏波面方向Aと45度の角度を成すようにしている。光弾性測定において検光子Aの偏光方向と偏光子Pの偏光方向を平行にする場合と、直角にする場合がある。両者の比の値から位相差を求めることができるのであるが分かりやすいことではないので、その原理を順をおって説明する。

【0047】試験光は波長 λ の単色光である。円偏光、橢円偏光、多様な偏波面の直線偏光を含む。試験光は偏

光子Pによって一方（図2のP方向）に偏波面をもつ直線偏光になる。それが $\lambda/4$ 板Q1によって右廻りの円偏光になる。 $\lambda/4$ 板の主軸は直線偏光Pに対して45度の角度をなすから、直線偏光はQ1方向とその直角の方向（Q2の方向）に半分ずつ分配される。だから第1の $\lambda/4$ 板の始端では、Q1方向偏波は $\cos(kx - \omega t)$ であり、Q2方向偏波も $\cos(kx - \omega t)$ で等しい。

【0048】ところが $\lambda/4$ 板Q1は、Q1、Q2にそった直交偏波Q1、Q2に対しQ1を90度遅らせるからQ1の終端では、Q2方向偏波が $\cos(kx - \omega t)$ にQ1方向偏波が $\cos(kx - \omega t - \pi/2) = \sin(kx - \omega t)$ となる。これは電場が右回りに回転することを意味するから時計廻り（右廻り）の円偏光である。だから第1の $\lambda/4$ 板Q1はP方向の直線平行を右回りの円偏光にするという作用がある。

【0049】より単純化して言えば $\lambda/4$ 板というものは直線偏光から90度位相を遅延させる主軸の方向へ回転する円偏光にするというものである。つまり偏光子と45度をなす $\lambda/4$ 板の組み合わせ（偏光子+ $\lambda/4$ 板）は遅延軸の方向へ回転する円偏光を作り出すということである。

【0050】光の伝搬は時間反転性があるから、反対に $\lambda/4$ 板+検光子の組み合わせの場合、遅延軸から検光子軸へと回転する円偏光は検光子を100%透過し、その反対に前進軸から検光子軸へと回転する円偏光は検光子が100%遮断することである。この点は分かりにくいかそういうことである。

【0051】だからもしも第2の $\lambda/4$ 板Q2の遅延軸が図2のQ1方向（45度）で、検光子軸がA方向（0度）であるとき、第2の $\lambda/4$ 板+検光子の光学系は右回り円偏光を100%透過することになる。

【0052】ところが実際には、第2の $\lambda/4$ 板Q2の遅延軸は図2においてQ2の方向（135度）を向いている。その場合、Q2+検光子の光学系は右回り円偏光を100%遮断することになる。

【0053】円偏光となった試験光が試料の中に入る試料厚みはtである。もし試料が複屈折を全くもたないな*

$$I^2(P \perp A) = I_0^2 \sin^2(\delta/2)$$

である。

【0060】検光子軸AがPに平行の時は、検光子の先※

$$I^2(P \parallel A) = I_0^2 \cos^2(\delta/2)$$

である。全体の光量 I_0^2 は両者の和によって与えられる。

【0062】

【数1】

$$\sin^2 \frac{\delta}{2} = \frac{I^2(P \perp A)}{I^2(P \perp A) + I^2(P \parallel A)}$$

* らば右廻りの円偏光のまま試験光が試料を通過する。その場合、Q2+検光子の光学系は右回り円偏光を100%遮断するので検光子A以後に試験光が全く出てこないことになる。つまり試料が複屈折率を持たないならば検光子Aの先には光が全く出ない。

【0054】しかし試料が複屈折率を持つとそうではないようになる。Q1方向の $\sin(kx - \omega t)$ とQ2方向の $\cos(kx - \omega t)$ の間に位相差 δ が与えられる。Q1方向に $\delta/2$ 、Q2方向に位相 $-\delta/2$ が与えられたとすると、Q1、Q2方向それぞれに $\sin(kx - \omega t + \delta/2)$ 、 $\cos(kx - \omega t - \delta/2)$ となる。試料の複屈折はQ1方向、Q2方向の偏波成分に位相差を与えるので右回り円偏光に、一部左回り円偏光を混合させる結果となる。

【0055】Q1 ; $\sin(kx - \omega t + \delta/2) = \cos(\delta/2) \sin(kx - \omega t) + \sin(\delta/2) \cos(kx - \omega t)$

【0056】Q2 ; $\cos(kx - \omega t - \delta/2) = \cos(\delta/2) \cos(kx - \omega t) + \sin(\delta/2) \sin(kx - \omega t)$

【0057】となる。これは試料を通過した光の $\cos(\delta/2)$ 部分は右回り円偏光で、 $\sin(\delta/2)$ 部分が左回り円偏光だということである。第2の $\lambda/4$ 板Q2と検光子Aの組み合わせは左回り円偏光だけを通すのであるから、 $\sin(\delta/2)$ の部分だけを通すということになる。だから図2のように並べていると、検光子Aの先に出る光量は全光量の $\sin^2(\delta/2)$ だけということになる。

【0058】全体の光量がわからないと δ が求められない。そこで検光子Aの主軸を図2のようにPと直角でなく、回転させてPと平行にする。すると第2の $\lambda/4$ 板Q2の遅延軸から検光子軸A（Pに等しい）を見る回転方向が右回りになる。つまりこの組み合わせは右回り光だけを通すようになる。右回り光は全光量の $\cos^2(\delta/2)$ である。つまり検光子軸AがPに直角の時は、検光子の先に出る光量は

【0059】

$$40\% \text{ に出る光量は } I^2(P \parallel A) = I_0^2 \cos^2(\delta/2) \quad (\text{右回り円偏光})$$

$$I^2(P \perp A) = I_0^2 \sin^2(\delta/2) \quad (\text{左回り円偏光})$$

【0061】
【0063】だから検光子AをPに直交させたときの透過光量と、平行にしたときの透過光量を測定し、その比の値から位相差 δ が求められる。 δ がわかると、

$$【0064】\delta = 2\pi c t C (\sigma_1 - \sigma_2) / \lambda$$

$$【0065】\text{から、歪値 } C (\sigma_1 - \sigma_2) \text{ が}$$

$$【0066】$$

$$【数2】$$

$$C(\sigma_1 - \sigma_2) = \frac{\lambda}{2\pi t} \sin^{-1} \left(\sqrt{\frac{I^2(P \perp A)}{I^2(P \perp A) + I^2(P \parallel A)}} \right)$$

【0067】によって計算することができる。tは試料の厚みである。歪値は無次元の量である。これがある閾値以上であれば劈開面が乱れ、閾値以下であれば劈開面が平滑になる、という予言を与えるのが本発明である。

【0068】しかし幾つかの問題がある。先述のように光弾性係数Cが未だ不明だということである。Cが不明だと $(\sigma_1 - \sigma_2)$ の絶対値はわからない。しかしそれは差し支えないことである。材料はGaNだと決まっているのだし温度Tも室温であるからCは定数だと考えられる。するとどの試料でも $(\sigma_1 - \sigma_2)$ の相対値を求めることができる。Cがわからないという問題は解決できる。

【0069】もう一つの問題は主軸の方向である。 σ_1 、 σ_2 は主軸方向の引っ張り応力であるが、その主軸を決めているのは $\lambda/4$ 板Q1、Q2の主軸方向（遅延軸）である。 $(\sigma_1 - \sigma_2)$ というのは、Q1方向の応力 σ_1 とQ2方向の応力 σ_2 の差がこうだということにすぎない。 $(\sigma_1 - \sigma_2)$ は回転不变量ではない。試料の結晶軸によって σ の方向を決めているのではなくて、光学系で σ の軸が規定されている。

【0070】もしも結晶中の主軸の方向がわかつており、それがx、y方向だとすると、 σ_x 、 σ_y が存在し、x面を介したy方向の剪断力 τ_{xy} 、y面を介したx方向の剪断力 τ_{yx} はともに0である。応力の主軸というのは剪断力0の方向として定義される。x軸と ϕ をなす角度方向の応力を σ_1 、 σ_2 、 τ とすると、これらは σ_x 、 σ_y から

$$\begin{aligned}\sigma_1 &= \sigma_x \cos^2 \phi + \sigma_y \sin^2 \phi \\ \sigma_2 &= \sigma_x \sin^2 \phi + \sigma_y \cos^2 \phi \\ \tau &= (\sigma_1 - \sigma_2) \sin \phi \cos \phi\end{aligned}$$

【0072】によって与えられる。つまり $\sigma_1 + \sigma_2 = \sigma_x + \sigma_y$ は回転不变量であるが、 $\sigma_1 - \sigma_2$ は回転不变量でない。

【0073】劈開面での剪断力 τ の揺らぎが劈開面の凹凸を発生させるのだから、 τ が最大になるのが劈開面に合致するようにすればよいのである。先述のように、GaNで劈開面は{1-100}であり、これはM面という通称がある。C面方向の結晶を成長させた場合、M面は表面に直角である。劈開面(M面)の方向はウエハの段階でわかっている。角型ウエハなら矩形の長さから、円形ウエハの場合はオリエンテーションフラットを付けるから劈開面の方向がわかる。

【0074】上の式から τ を最大にするのは、 $\phi = 45$ 度のときである。そのとき $\tau = (\sigma_1 - \sigma_2)/2$ である。 τ が劈開面の剪断力だということにすれば、 $(\sigma_1 - \sigma_2)$ の揺らぎが劈開面の凹凸を発生させるのだという推論は理解し易いものになる。

【0075】ということは光学系の主軸Q1、Q2を劈開面(M面；{1-100})に対して45度の傾斜角をなすように配置すればよいということである。つまり偏光子Pの偏光方向を劈開面(M面；{1-100})に平行あるいは垂直にすれば良いのである。

【0076】そして本発明は実験によって、GaN厚み $t = 150 \mu m$ のときに、歪 $C(\sigma_1 - \sigma_2)$ の閾値が 5×10^{-5} であることを初めて見出した。

【0077】 $C(\sigma_1 - \sigma_2) \leq 5 \times 10^{-5}$

【0078】なら、そのGaN基板は劈開性優れた良品だと判定する。反対に

【0079】 $C(\sigma_1 - \sigma_2) > 5 \times 10^{-5}$

なら、そのGaN基板は劈開性に乏しい不良品だと判定する。

【0080】

【実施例】 [実施例1 (成長速度 $100 \mu m/h$ 以下)] HVPE法によってGaN基板を作製した。HVPE法は既に述べたように図1に示す装置によってGaNを成長させるものである。原料は金属GaN融液と、水素で希釈した塩化水素(HCl)ガス、水素で希釈したアンモニア(NH₃)ガスである。基板はGaN基板であり、ドット状の窓を千鳥に配置したマスクを付け、その上にGaNバッファ層を比較的低温で成長させた。孤立した窓において島状にGaN結晶核が独立に成長を開始する。

【0081】バッファ層はGaNとGaNの格子不整合を吸収するためのものであり $50 \mu m \sim 100 \mu m$ の薄いものである。バッファ層はマスクよりも薄い。その後温度を上げてGaNエピ成長を行う。その時のエピ成長の速度wは、 $100 \mu m/h$ 以下である。エピ成長膜の厚みは $0.5 mm$ 以上とする。もちろん時間を掛けると厚く積層することができる。王水でGaN種結晶を除去する。厚くした場合は、内周刃スライサーによって一定厚さの複数のウエハに切断する。このウエハを研磨して $150 \mu m$ の厚さの試験ウエハとした。

【0082】厚いウエハは自然劈開しにくいし、薄いウエハは自然劈開が容易である。左様に厚さは重要な劈開性を評価するときの因子の一つである。このように薄くするのは自然劈開が可能なようになるためである。

【0083】インゴットから切り取ったウエハはアズカットウエハと言う。これは $500 \mu m$ 程度の厚いウエハである。これをラッピング、エッチングして加工変質層を除去し厚みを整え研磨したのがミラーウエハである。ミラーウエハは純粋にGaNだけからなる。その上にG

a InN層やGaN層を積層したものがエピタキシャルウエハである。ハンドリングを容易にするため、これもかなりの厚みがある。デバイスメーカーでエピタキシャルウエハの上に気相成長、拡散、蒸着、エッチングなどを含むウエハプロセスによってデバイスを作製する。その後ウエハの裏面を研磨して薄くする。このときの厚みが $150\mu\text{m}$ である。

【0084】薄い方が劈開しやすいしパッケージに取り付けてLD、LEDとしたときの放熱性がよい。しかしあまりに薄くすると破損する可能性が高くなる。だから最終的な厚みを幾らにするかということは目的により製造者により相違する。所定厚みまで薄くしたものを劈開してミラー面とする。ここでは最終厚みが $150\mu\text{m}$ の場合を想定している。

【0085】だからこの劈開試験においても $150\mu\text{m}$ まで薄く研磨加工している。このGaNウエハは結晶成長して研磨しただけのものであり、エピタキシャルウエハでないしデバイスを作製したウエハでもないが劈開の条件を等しくするために最終的なデバイス作製研磨後の厚さに等しくしている。気相成長したGaN基板と、デバイスを作製したウエハでは薄膜の種類が違うので厳密に同じものではないがエピ層は大部分はGaN層でありし全体の膜厚が等しいので劈開に対する特性もほぼ同一であろうと考えられる。

【0086】劈開試験は次のようにする。金属メスによって基板の劈開方向(1-100)に傷を付け、その線に沿って手でウエハを割った。うまく劈開できた。そして劈開面を顕微鏡観察した。図5が劈開面の顕微鏡写真である。

【0087】さらにその劈開面において一定間隔で、光弾性を用いて残留歪を測定した。残留歪の測定結果を図3において太い破線によって示す。横軸は測定点の位置である。劈開面の幅は $150\mu\text{m}$ であるが長手方向には基板長さだけある。ここでは中央部付近の 5mm の幅についての結果を示している。横軸は長手方向の位置(cm)である。縦軸は光弾性測定による歪である。横線は本発明が閾値とする 5×10^{-5} の線である。

【0088】もちろん閾値は、研磨後のGaNウエハの厚みによって変わるはずである。ここでは $150\mu\text{m}$ に研磨しているからこれが閾値になる。より薄くすれば劈開はより容易になるから閾値は下がるだろうし、より厚ければ劈開はより難しくなり閾値は上がるであろう。しかし放熱性、強度などを考えるとGaNウエハは最終的に $100\mu\text{m} \sim 200\mu\text{m}$ 程度に削られることであろう。すると内部歪の閾値も 5×10^{-5} 程度であろうと推定される。

【0089】 $3.3 \times 10^{-5} \sim 4.5 \times 10^{-5}$ の範囲に歪が分布している。ばらつきはあるが、比較的小さい。最大の位置でも 4.5×10^{-5} である。どの位置でも閾値 5×10^{-5} の線より下にあるということがわ

かる。

【0090】劈開面が比較的綺麗だといつてもそれだけでは定量的に判断できない。劈開面の凹凸を数量的に評価する必要がある。そこで劈開面の面粗度Raを劈開面にそって図3と同じ全ての点で測定した。その測定によって、光弾性効果による歪C($\sigma_1 - \sigma_2$)が増えるとRaも増え、歪が減るとRaも低くなるという相関があることが分かった。自然劈開は{1-100}面を綺麗に露呈するはずのものであるが、内部応力が存在すると加えられた力の方向がねじ曲がり割れる面が狂ってくるのであろう。

【0091】局所的な内部応力と劈開面の局所的な粗度に相関があるというようなことはどのような結晶でも具体的に調べられたことはない。Si半導体、GaAs半導体ICなどでもチップに切り出すときは自然劈開で分離するが劈開面が平坦平滑であるという必要性は薄い。劈開面が問題になるのは共振器が不可欠のレーザの場合だけである。GaAs系のレーザの場合は自然劈開でレーザ共振器面が容易に得られるのでそのような必要性はなかった。まして新規な結晶であるGaNについての研究もない。

【0092】GaNにおいて内部歪と劈開面凹凸の間に何らかの相関があるということを指摘したのは本発明が最初である。そのようなことは実際に実験をしてみないと分からない。

【0093】それには実験自身が困難であるということがあった。凹凸は顕微鏡で見てわかるが、局所的な内部歪は顕微鏡では分からぬ。歪は内在的な潜在力であり目に見えるものではない。ウエハの全体としての歪はウエハの曲がり(曲率)によってわかるが、それは平均化された全体のもので局所的なものでない。局所的な内部歪を知るため本発明者は光弾性効果を利用することを思い付いた。それによって結晶内部の歪を局所的に測定できた。局所的ということが重要である。本発明者が初めて局所的な結晶歪を測定し、劈開面の局所乱れとの関連を見出したのである。

【0094】劈開面の長手方向において全ての点でそのような正の相関の存在が確かめられた。このような知見自体新規なものである。実施例1において、劈開面の全ての点で面粗度Raは 10nm 以下である事が分かった。これだけだと何が閾値を与えるのかがハッキリしないが、のちに比較例の試験をしたので閾値が明確になってくる。

【0095】面粗度の定義は幾つかあり、どの面粗度で測定したかによって値が違うので注意しなければならない。例えばRmaxという面粗度の表現がある。これは粗度の最大値という意味である。適当な平均の平面を仮定し、その平面より上方へ偏奇した凸部の高さと下方へ偏奇した凹部の深さの和の最大値をいう。これは凹凸の最大であるから分かりやすい。が、曲面になっていると

大きく出すぎるし面積に依存して増えるから局所的な凹凸の表現としては向いていない。しかしそく使用される面粗度の種類であるからここに述べた。

【0096】 R_a というのは、隣接する山と谷の高さの差を平均したものである。だから巨視的な歪があるても、それによって面粗度が見かけ上過大になるということはない。また平均値だから面積が増えると増えるというようなこともない。劈開面は全体として平面であるし劈開面の乱れというのは凹凸の深さ高さと凹凸の数をいうのであるから平均の粗度を表現する R_a が劈開面の乱れを評価するものとしてはより適しているといえよう。その他にも面粗度を測定するパラメータが存在する。 R_{max} は R_a の数倍から数十倍であることが多い。面粗度として何を用いているかに注意し、 R_{max} と R_a を混同してはならない。

【0097】劈開面は幅は $150 \mu m$ で狭いが長さがあって長手方向には面粗度が変わり、 $R_a 8 nm$ とか $R_a 7 nm$ 或いは $R_a 5 nm$ というように変動する。しかしどの位置でも $R_a 10 nm$ を越えないということがわかった。面粗度 R_a が $10 nm$ 以下というのは優れて平滑平坦であり凹凸が少ないということである。研磨してそのような面になるということはあるが自然劈開だけで研磨していないのに $R_a 10 nm$ 以下であった。良い GaN 基板だということがわかる。

【0098】図5は実施例1のGaN結晶の自然劈開面の顕微鏡写真である。下縁に僅かな凹凸が見られるが、中間部と上部はミラー面となっている。LDのミラー面として充分の平滑性である。

【0099】【比較例1（成長速度 $100 \mu m/h$ 越え）】比較のため別のGaN基板をHYPE法によって作製した。成長の条件は実施例1とほぼ同様であるが、成長速度だけが違う。比較例のGaN結晶は、 $100 \mu m/h$ を越える成長速度で製造した。そしてGaNAs結晶を除去してGaNの単体結晶とした。

【0100】エピ成長膜の厚みは $0.5 mm$ 以上とする。このウエハを研磨して $150 \mu m$ の厚さの試験ウエハとした。比較例1の試験ウエハについても同様の劈開試験を行う。

【0101】金属メスによって基板の劈開方向（1-100）に傷を付け、その線に沿って手でウエハを割つた。劈開できただけでも劈開面に凹凸があった。平滑な劈開面は得られなかった。劈開面を顕微鏡観察した。図6が劈開面の顕微鏡写真である。

【0102】さらにその劈開面において一定間隔で、光弾性を用いて残留歪を測定した。残留歪の測定結果を図3において細い実線によって示す。横軸は測定点の位置である。劈開面の幅は $150 \mu m$ であるが長手方向には基板長さだけある。ここでは中央部付近の $5 mm$ の幅についての結果を示している。横軸は長手方向の位置（cm）である。縦軸は光弾性測定による歪である。横線は

本発明が閾値とする 5×10^{-5} の線である。

【0103】歪の全体的な数は、実施例1に比べて大きい。歪のばらつきは大きく 3×10^{-5} 未満のこともある ($0.01 cm \sim 0.04 cm$) が、 4×10^{-5} 程度のこともある。 $0.6 mm$ の観測位置で閾値 5×10^{-5} の線を越え 5.5×10^{-5} に達している。 0.37 の位置でも閾値 5×10^{-5} を越え 5.9×10^{-5} に到達している。歪の変化率は大きくて滑らかに変動するというのではない。

【0104】劈開面の面粗度が大きいのが顕微鏡写真によってよくわかる。しかしそれでは定性的な印象に留まるから、長手方向において劈開面での面粗度 R_a を測定した。先に述べたように R_a という面粗度は隣接山谷高さの差の局所的な平均値であるから劈開面の長手方向で変動する。図3と同様に全ての位置で R_a を測定した。 R_a は光弾性による歪と相関があり、歪 $C(\sigma_1 - \sigma_2)$ が大きいと R_a も大きくなるような傾向があった。正比例というようなハッキリしたものではないが正の相関があった。

【0105】歪 $C(\sigma_1 - \sigma_2)$ が 5×10^{-5} を越えると、面粗度 R_a は $100 nm$ 以上に増大してしまうことが分かった。図6は比較例において劈開面の歪が 5×10^{-5} 以上である部位の劈開面の顕微鏡写真である。下縁に大きく波打つ凹凸が存在する。上縁にも波状の凹凸がある。中間部にも面の乱れがある。

【0106】比較例のGaN基板においても、歪が閾値 5×10^{-5} より低いところが幾らもあるが、閾値より高いところを幾つか含む。そのようなGaN基板を使用してLDを作った場合製品歩留まりが悪くなる。だから閾値より高い部位を含む基板は初めから不良とした方が無駄がなくて最終的な歩留まりが高くなる。

【0107】ということは初めから、光弾性効果歪の最大値が閾値より高いウエハは使わない、ということである。

【0108】図4はGaN基板の光弾性効果による歪 $C(\sigma_1 - \sigma_2)$ と、劈開断面図の面粗度 R_a の関係を示すグラフである。横軸は $C(\sigma_1 - \sigma_2)$ である。縦の線は閾値 5×10^{-5} の線である。縦軸は R_a であるがこれは対数目盛りとなっている。実施例1、比較例1において、劈開面の長手方向に沿って（一定間隔に取つた）全ての位置での歪と R_a の関係が分かっているからそれを破線によって示したものである。▲基板Aとあるのは比較例1の基板中の最大の歪・最大の粗度を与える部分のデータを示す。◇基板Bとあるのは実施例1の基板中の最大の歪・最大の粗度を与える部分のデータである。

【0109】歪の閾値の近傍で、 R_a が急増することがわかる。これ以下の歪の場合 R_a は $10 nm$ (100オングストローム) 以下であるし、これ以上の歪の場合 R_a は $100 nm$ (1000オングストローム) 以上にな

ってしまう。

【0110】だからGaNウェハを評価する場合、光弾性効果歪の最大値を閾値 5×10^{-5} と比較して良否を決定すれば良いということになる。

【0111】

【発明の効果】従来はGaN基板の劈開性を予め判定する手段がなかった。基板の上に複数の窒素化合物薄膜をエピタキシャル成長してウェハプロセスによってLE D、LDなどデバイスを作製しチップに劈開して初めてウェハの劈開性の良否がわかった。本発明はGaN基板にレーザ光を当てて光弾性効果によって歪を測定し歪値が 5×10^{-5} 以下であれば劈開性良好、以上であれば劈開性不可と判定する。本発明によれば光弾性効果によってGaN基板の劈開性をデバイス作製に先だって非破壊で判定することができる。GaN基板の劈開性を実際に劈開しなくても予見することができるようになる。

【0112】ウェハの良否を予め判断し特性が不可と判定されたウェハはエピタキシャル成長せず除去できる。不可と判定されたGaN基板については、エピタキシャル成長に続く、フォトリソグラフィ、薄膜成長などのウェハプロセスを行わないことになる。劈開性の劣悪な基板の上にウェハプロセスによってデバイスを作製するという無駄を省くことが可能になる。

【0113】本発明によってGaN基板の劈開性を予め判断する事ができるようになって初めて、GaN基板の上にGaN系の半導体レーザ(LD)を作つて自然劈開によってレーザの共振器(キャビティ)のミラー面を形成できるのである。初めから劈開性の劣悪なウェハを除くので歩留まりを高めることができる。その歩留まり向上によって初めて、GaN基板のLDが、従来のようにサファイヤ基板の上にGaN系LDを作りドライエッチングやイオンミリングによってミラー面を作製するという手間の掛かるサファイヤ基板LDより優れた*

*ものとなる。

【図面の簡単な説明】

【図1】GaN単結晶を作製するHYPE法の反応炉の概略を示す断面図。

【図2】光弾性測定装置の概略を示す構成図。

【図3】実施例1にかかるGaN基板B(破線)と、比較例1にかかるGaN基板A(実線)の直径に沿う線に取った観測点での光弾性効果の測定結果を示すグラフ。横軸は観測位置(cm)である。縦軸は光弾性効果による歪の値C($\sigma_1 - \sigma_2$)である。横に引いた線が歪の閾値を与える 5×10^{-5} の線である。

【図4】GaN基板の光弾性効果による歪の値C($\sigma_1 - \sigma_2$)と、劈開面断面の面粗度Raとの関係を示すグラフ。横軸は歪値C($\sigma_1 - \sigma_2$)であり、縦軸は面粗度Ra(オングストローム)である。◇が実施例1にかかるGaN基板Bのデータを、▲が比較例1にかかるGaN基板Aのデータを示している。

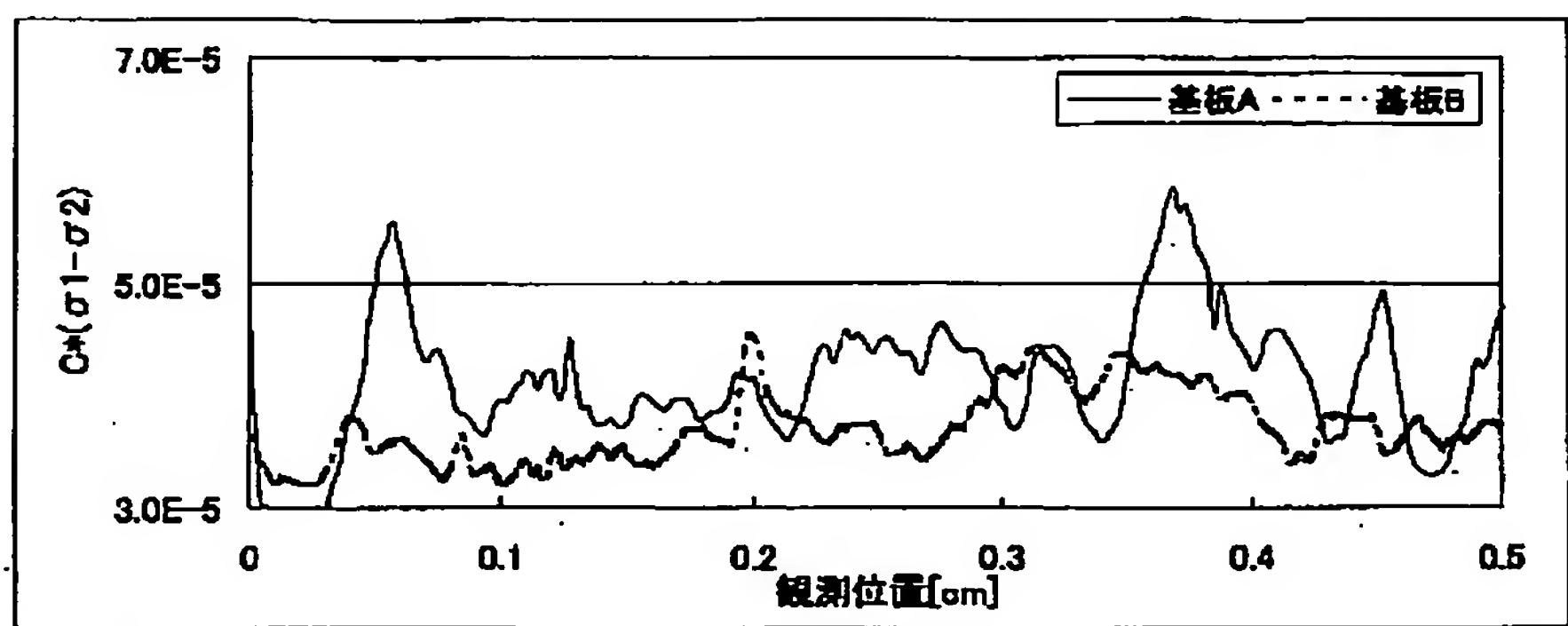
【図5】実施例1にかかるGaN基板Bの劈開面の写真。面粗度Raは10nm以下である。

【図6】比較例1にかかるGaN基板Aの劈開面の写真。面粗度Raは100nm以上である。

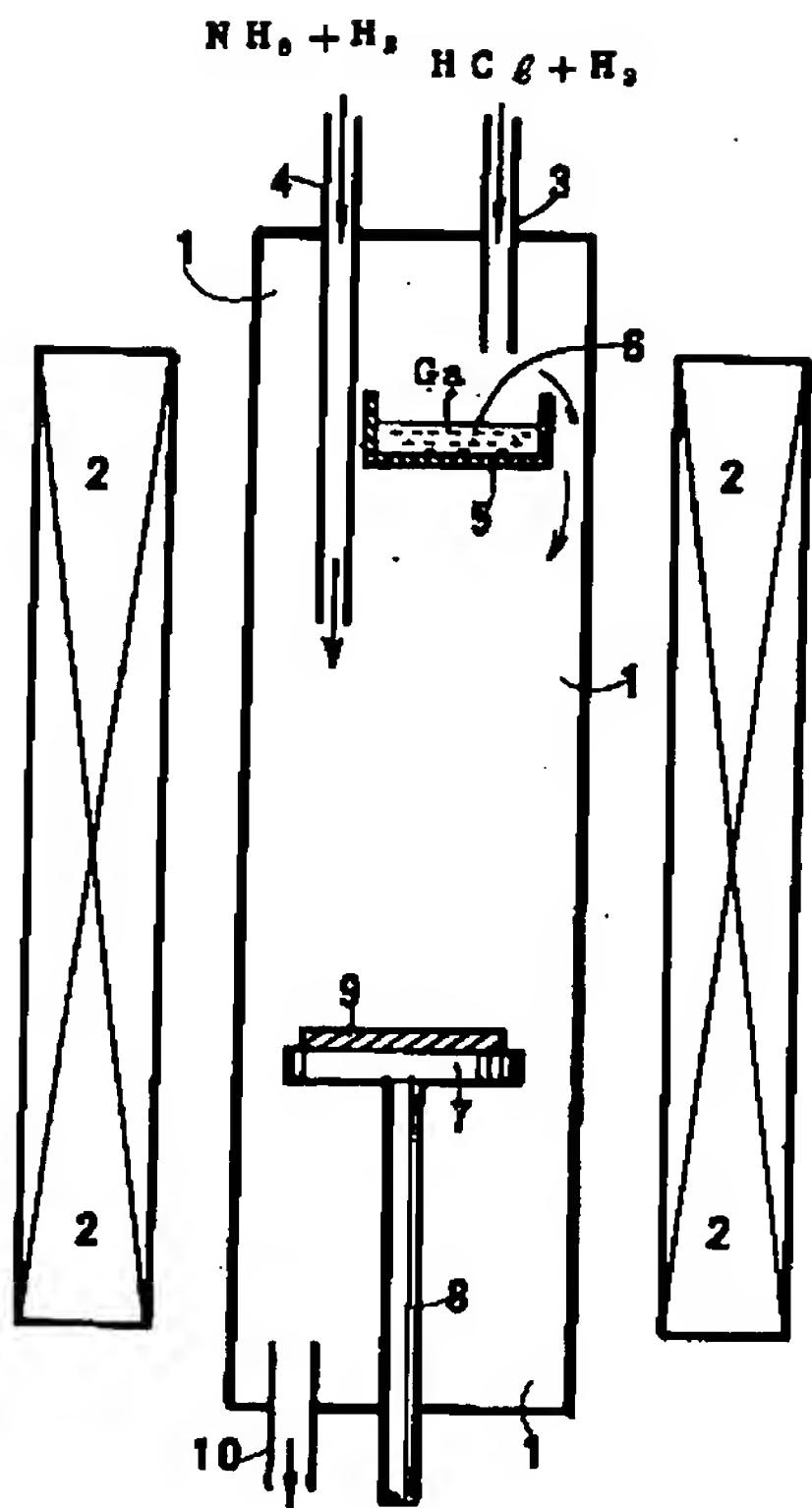
【符号の説明】

- 1 HYPE反応炉
- 2 ヒータ
- 3 原料ガス導入管
- 4 原料ガス導入管
- 5 Ga溜(Gaポート)
- 6 Ga融液
- 7 サセプタ
- 8 回転軸
- 9 基板
- 10 ガス排出口

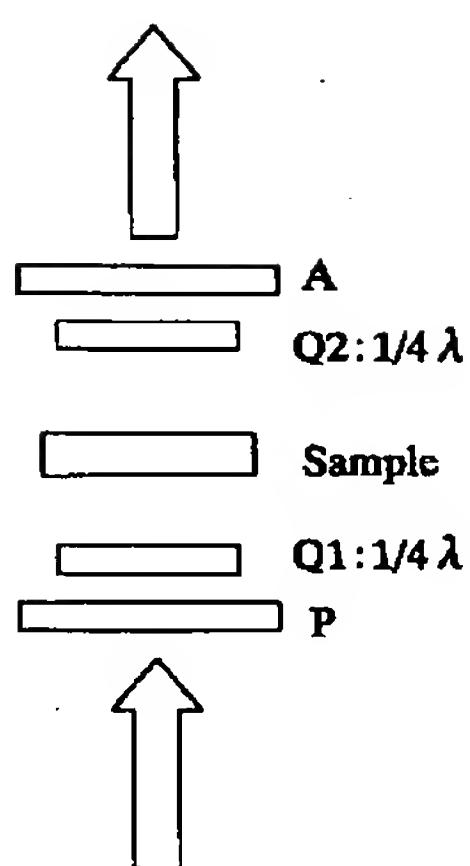
【図3】



【図1】



【図2】

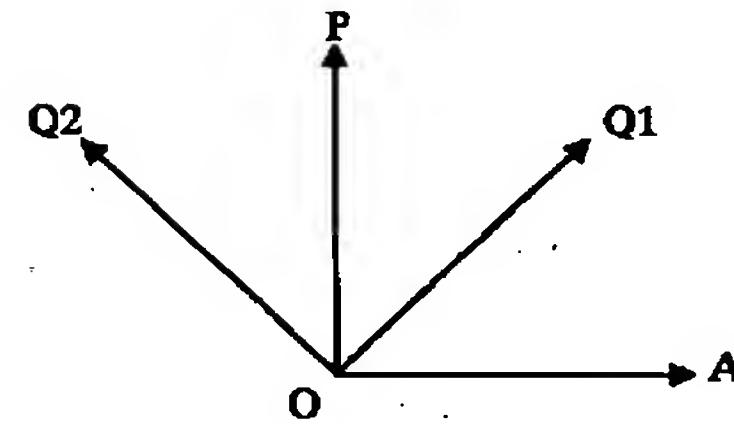


$$I_{PLA} = I_0 \sin^2\left(\frac{\delta}{2}\right) \quad \dots \dots \dots (1)$$

$$I_{PHA} = I_0 \cos^2\left(\frac{\delta}{2}\right) \quad \dots \dots \dots (2)$$

$$I^2 = \frac{I_{PLA}^2 + I_{PHA}^2}{2} - \sin^2\left(\frac{\delta}{2}\right) \quad \dots \dots \dots (3)$$

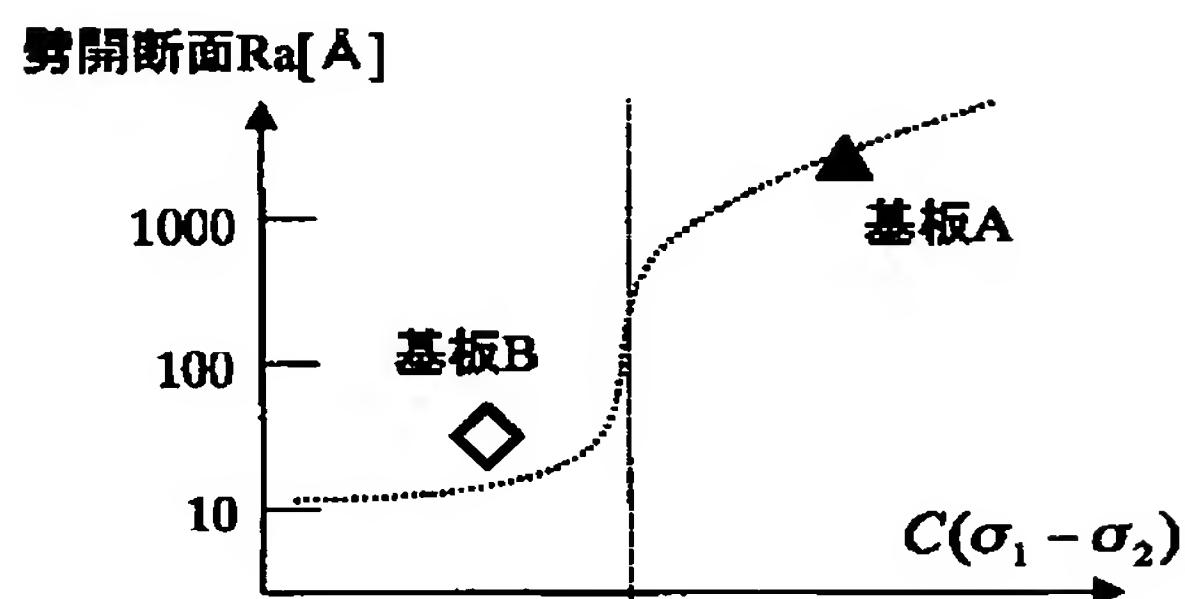
$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} Ct(\sigma_1 - \sigma_2) \quad \dots \dots \dots (4)$$

 λ : 入射光の波長 t : サンプル厚 C : 光弾性定数 $\sigma_1 - \sigma_2$: 主応力差

【図5】

Ra ≤ 100 Å

【図4】



【図6】

Ra ≥ 1000 Å